

М.В. ЛЯШЕНКО, канд. физ.-мат. наук, учёный секретарь, Институт ионосферы, Харьков

ЭФФЕКТЫ ЧАСТНОГО ЗАТМЕНИЯ СОЛНЦА 4 ЯНВАРЯ 2011 г. В ВАРИАЦИЯХ ПАРАМЕТРОВ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ИОНОСФЕРЕ

Представлено результаты моделирования вариаций параметров тепловых процессов у геокоsmической плазмы под час затмения Солнца (ЗС) 4 января 2011 г. Показано, что ЗС istotно впливає на тепловий режим іоносфери. Приведено результати порівнювального аналізу ефектів ЗС у варіаціях параметрів теплових процесів у геокоsmосі в період з 1999 по 2011 рр., які зареєстровано за допомогою харківського радару некогерентного розсіяння.

Представлены результаты моделирования вариаций параметров тепловых процессов в геокоsmической плазме во время затмения Солнца (ЗС) 4 января 2011 г. Показано, что ЗС существенно повлияло на тепловой режим ионосферы. Приведены результаты сравнительного анализа эффектов ЗС в вариациях параметров тепловых процессов в геокоsmосе в период с 1999 по 2011 гг., зарегистрированных с помощью харьковского радару некогерентного рассеяния.

Modeling results of thermal processes parameters variations in geospace plasma during solar eclipse (SE) on 4 January 2011 are presented. It is shown that SE has essentially affected a thermal mode of an ionosphere. Comparative analysis results of the SE effects in variations of thermal processes parameters in geospace for the period 1999–2011, registered by means of the Kharkov incoherent scatter radar are given.

Введение. Затмения Солнца (ЗС) представляют собой одно из уникальных явлений в геокоsmосе. Во время ЗС происходит заметная перестройка структуры околоземной среды, подобная той, что имеет место во время захода и восхода Солнца. Солнечные затмения оказывают существенное влияние на поведение подсистем в нелинейной открытой системе Земля – атмосфера – ионосфера – магнитосфера (ЗАИМ) [1]. В ионосфере, как одной из подсистем ЗАИМ, эффекты затмений заметно проявляются в вариациях параметров динамических и тепловых процессов геокоsmической плазмы. Ранее с помощью радару некогерентного рассеяния (НР) в Харькове были выполнены наблюдения нескольких ЗС в период с 1999 по 2008 гг. Получена уникальная геофизическая информация о поведении основных параметров ионосферы, физических процессов в геокоsmической среде в течение ЗС [2 – 9].

Целью данной работы является изложение результатов моделирования параметров тепловых процессов в геокоsmической плазме во время частного затмения Солнца 4 января 2011 г.

Общие сведения о затмении Солнца. ЗС 4 января 2011 г. было частным. Затмение над Харьковом наблюдалось с 07:29 UT до 10:28 UT. Максимальное покрытие солнечного диска имело место в 08:58 UT. Покрытие диска Солнца по площади составило 0.71, по диаметру – 0.78.

Освещенность поверхности Земли и околоземной среды в момент главной фазы ЗС уменьшилась почти в 4 раза. Общая продолжительность солнечного затмения составила 2 ч 59 мин.

Исходные теоретические соотношения. Для расчета параметров тепловых процессов в геокосмической плазме используем известные теоретические соотношения приведенные ниже.

Энергия, подводимая к электронному газу. В области F ионосферы частота столкновений электронов с нейтралами становится меньше, чем с ионами. В этом случае основными механизмами охлаждения электронного газа являются потеря тепла при столкновениях электронов с ионами, возбуждение тонкой структуры атомов кислорода и теплопроводность электронного газа [10]. Имеет место перенос фотоэлектронов и связанный с этим переносом нелокальный нагрев электронного газа.

На высотах $z \leq 350$ км теплопроводностью электронного газа можно пренебречь и уравнение баланса энергии электронов в стационарном случае в системе СИ имеет вид [10]

$$\begin{aligned} Q &= L_{ei} + L_e, \\ L_{ei} &= 8 \cdot 10^{-32} N^2 (T_e - T_i) T_e^{-3/2}, \\ L_e &= 6.4 \cdot 10^{-37} N N(O) (T_e - T_i) T_n^{-1}, \end{aligned}$$

где Q – энергия, передаваемая тепловым электронам при кулоновских столкновениях с фотоэлектронами; L_{ei} – энергия, теряемая при электрон-ионных столкновениях; L_e – энергия, затрачиваемая на возбуждение тонкой структуры атомов кислорода; N – концентрация электронов; $N(O)$ – концентрация атомов кислорода; T_e и T_i – температура электронов и ионов соответственно. Температура нейтралов T_n и концентрация $N(O)$ рассчитывалась с привлечением модели NRLMSISE-00 [11].

Поток тепла, переносимого электронами. Тепловой баланс электронного газа зависит от величины потока тепла, переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу. Тепло в плазмосфере накапливается за счет сверхтепловых электронов, убегающих из места своего образования во внешнюю ионосферу. Часть электронов теряют свою энергию в кулоновских соударениях с тепловыми электронами и ионами. Другая часть электронов попадает в магнитную силовую трубку. В силовой магнитной трубке захваченные электроны термализуются в процессе многократных отражений от концов трубки. Таким образом, в плазмосфере имеет место накопление тепла, которое поступает обратно в ионосферу посредством теплопроводности электронного газа [10, 12, 13].

Тепловой поток можно определить из кинетического уравнения с учетом переноса сверхтепловых электронов. Выражение для расчёта

величины плотности потока тепла, поступающего из плазмосферы в вертикальном направлении, имеет вид [12, 13]:

$$\Pi_T = -\kappa_e \sin^2 I \frac{\partial T_e}{\partial z}, \quad (1)$$

где $\kappa_e = 2.08 \cdot k^2 NT_e / mv_{ei}$ – продольная составляющая тензора теплопроводности электронного газа, k – постоянная Больцмана, m – масса электрона.

Частоту соударений электронов с ионами O^+ для расчёта величины продольной составляющей тензора теплопроводности в (1) можно найти, используя выражение вида [2, 3, 14]:

$$v_{ei} \approx 5.5 \cdot 10^{-6} NT_e^{-3/2} \ln(2.2 \cdot 10^4 T_e N^{-1/3}).$$

Результаты расчётов. *Подвод энергии к электронам.* На рис. 1 приведены временные вариации величины энергии, подводимой к электронам Q/N во время затмения и контрольный день на фиксированных высотах. Как видно из рисунка, эффекты ЗС в вариациях Q/N проявились достаточно заметно. Солнечное затмение привело к значительному уменьшению величины Q/N в диапазоне высот 210 – 290 км. Значения Q/N до ЗС составляли $2.75 \cdot 10^{-21}$, $1.3 \cdot 10^{-21}$ и $0.5 \cdot 10^{-21}$ Дж·с⁻¹ на высотах 210, 240 и 290 км соответственно. Во время затмения Q/N уменьшилась до значений $1.5 \cdot 10^{-21}$, $0.7 \cdot 10^{-21}$ и $0.2 \cdot 10^{-21}$ Дж·с⁻¹ на высотах 210, 240 и 290 км соответственно. Таким образом, в максимальную фазу затмения падение Q/N составило примерно 45 – 60 % в рассматриваемом диапазоне высот.

Потоки тепла из плазмосферы. На рис. 2 представлены вариации плотности потока тепла, переносимого из плазмосферы в ионосферу в день ЗС 4 января 2011 г. и контрольные сутки 5 января 2011 г. на фиксированных высотах.

Как видно из рис. 2, в период затмения имело место уменьшение Π_T по модулю примерно на 60 – 70 % в диапазоне высот 290 – 410 км.

В целом, ЗС 4 января 2011 г. привело к существенной перестройке теплового режима ионосферы.

Обсуждение полученных результатов. *Подвод энергии к электронному газу.* Солнечное затмение 4 января 2011 г. существенно повлияло на параметры тепловых процессов в геокосмической плазме. Во время ЗС имела место перестройка теплового режима ионосферы. Как показали расчеты, затмение привело к уменьшению величины энергии, подводимой к электронам. Уменьшение Q/N в диапазоне высот 210 – 290 км составило 45 – 60 %.

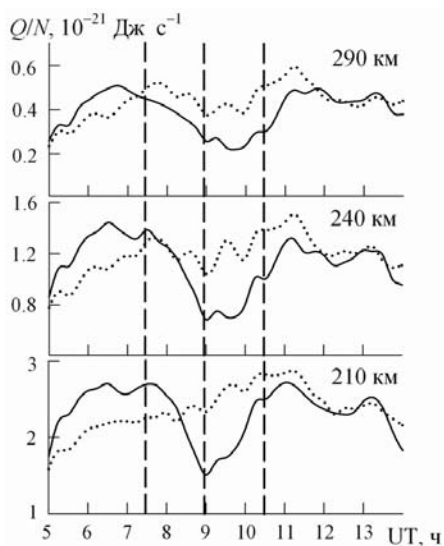


Рис. 1. Временные вариации величины энергии, подводимой к электронам Q/N во время ЗС 4 января 2011 г. (сплошная) и контрольный день 5 января 2011 г. (точки) на фиксированных высотах. Вертикальными линиями отмечены моменты начала, максимальной фазы и окончания ЗС

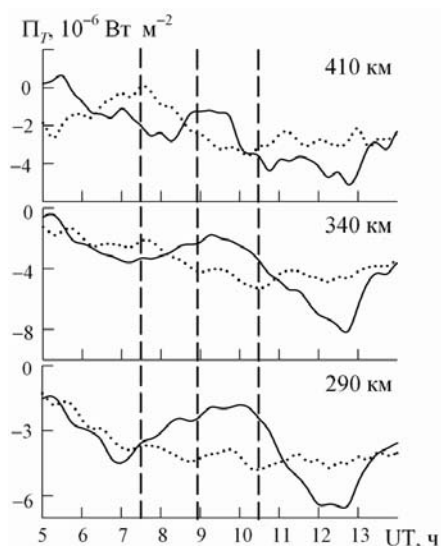


Рис. 2. Временные вариации плотности потока тепла, переносимого электронами P_T во время ЗС 4 января 2011 г. (сплошная) и контрольный день 5 января 2011 г. (точки) на фиксированных высотах

Следует отметить, что вариации Q/N во время ЗС качественно отражали вариации температуры электронов [15]. Уменьшение величины энергии, подводимой к электронному газу, можно объяснить тем, что в период затмения имеет место уменьшение удельной энергии, передаваемой фотоэлектронами электронам на высотах $z < 350$ км [12, 13].

Потоки тепла. Хорошо известно, что при наличии разности температур в среде от слоя с более высокой температурой к слою с более низкой температурой устанавливается тепловой поток. В ионосфере обычно $\partial T_e / \partial z > 0$ и $P_T < 0$. Это означает, что поток тепла направлен вниз в ионосферу. Температура электронов в момент максимального покрытия диска Солнца уменьшилась примерно на 130 – 370 К в диапазоне высот 190 – 410 км [15]. Уменьшение (по модулю) P_T вблизи главной фазы затмения составило примерно 60 – 70 % в диапазоне высот 290 – 410 км. Это связано, главным образом, с охлаждением электронного газа ($P_T \propto T_e^{5/2} \partial T_e / \partial z$). Таким

образом, эффекты ЗС 4 января 2011 г. заметно проявились и в вариациях плотности потока тепла, переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу.

Сравнение эффектов ЗС 11 августа 1999 г., 31 мая 2003 г., 3 октября 2005 г., 29 марта 2006 г., 1 августа 2008 г. и 4 января 2011 г. В работах [2 – 9, 15] представлены результаты наблюдений эффектов в околоземной среде во время частных ЗС 11 августа 1999 г., 31 мая 2003 г., 3 октября 2005 г., 29 марта 2006 г., 1 августа 2008 г. и 4 января 2011 г., зарегистрированных с помощью радара НР в Харькове.

В табл. 1 представлены основные характеристики частных ЗС над Харьковом в 1999 – 2011 гг., а именно время начала T_1 , главной фазы T_{\max} и окончания T_2 ЗС, значения функции покрытия солнечного диска по площади (A) и диаметру (D/D_0). В таблице также приведена информация о солнечной и геомагнитной активности для рассматриваемых дат.

В табл. 2 приведены данные об относительном изменении параметров тепловых процессов ($\Delta(Q/N)$ и ΔP_T) для каждого из рассматриваемых затмений в соответствующем диапазоне высот.

Из табл. 1 видно, что наиболее подходящими для сравнения являются ЗС 11 августа 1999 г. и 29 марта 2006 г. Для указанных ЗС значения функций покрытия диска Солнца A и время наступления максимальной фазы практически совпадали. Геомагнитная обстановка для рассматриваемых периодов была спокойной. Следует также отметить, что затмение 11 августа 1999 г. имело место в период максимума солнечной активности (СА), а солнечное затмение 29 марта 2006 г. в период минимума СА.

Эффекты ЗС в 1999 и 2006 гг. достаточно уверенно наблюдались в вариациях величины энергии, подводимой к электронному газу. Так, во время затмений 11 августа 1999 г. и 29 марта 2006 г. величина Q/N уменьшилась примерно на 20 – 30 % в диапазоне высот 290 – 340 км. Для затмения 3 октября 2005 г., максимальная фаза которого не превышала 15 %, уменьшение Q/N составило около 20 – 40 % в рассматриваемом высотном диапазоне. Для затмения 4 января 2011 г., фаза которого была близка по величине фазам ЗС 11 августа 1999 г. и 29 марта 2006 г., но само затмение имело место вблизи местного полдня, уменьшение Q/N составило 45 – 60 % в диапазоне высот 210 – 410 км.

Вариации плотности потока тепла, переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу для всех ЗС качественно подобны. Во всех случаях наблюдается уменьшение модуля P_T в момент максимального покрытия диска Солнца. Во время затмения 11 августа 1999 г. уменьшение плотности потока пепла (по модулю) составило около 50 % на высоте 310 км (см. табл. 2). В период затмения 29 марта 2006 г. P_T уменьшилась примерно на 17 – 37 % в диапазоне высот 290 – 340 км. Для затмения 3 октября 2005 г. уменьшение P_T составило около не более 17 % в рассматриваемом диапазоне

высот. Как показали расчеты, во время ЗС 4 января 2011 г. имело место уменьшение Π_T примерно на 60 – 70 % в диапазоне высот 210 – 410 км.

Таблица 1
Основные сведения о ЗС и гелиогеофизической обстановке в период с 1999 по 2011 гг.

Дата	T_1 , UT	T_{\max} , UT	T_2 , UT	A	D/D_0	$F_{10.7}$	$\bar{F}_{10.7}$	A_p
11.08.99 г.	09:57:32	11:15:40	12:29:27	0.746	0.794	131	158	6
31.05.03 г.	02:16:08	03:14:34	04:17:27	0.658	0.740	113	125	49
03.10.05 г.	08:41:40	09:41:57	10:42:34	0.153	0.263	74	79	7
29.03.06 г.	10:02:47	11:12:59	12:21:59	0.724	0.774	82	78	6
01.08.08 г.	09:11:28	10:15:41	11:17:47	0.329	0.439	66	66	3
04.01.11 г.	07:29:36	08:58:30	10:28:36	0.709	0.780	91	83	4

Таблица 2
Вариации параметров тепловых процессов

Дата	z , км	$\Delta(Q/N)$, %	$\Delta\Pi_T$, %
11.08.99 г.	308	30	50
31.05.03 г.	270	30	48
03.10.05 г.	290 – 340	20 – 40	13 – 17
29.03.06 г.	290 – 340	20 – 25	17 – 37
01.08.08 г.	210 – 340	12	9 – 16
04.01.11 г.	210 – 410	45 – 60	60 – 70

Сравнительный анализ показал, что для каждого из затмений наблюдается качественное подобие эффектов в вариациях параметров тепловых процессов в геокосмосе. Количественные различия в вариациях параметров ионосферы и динамических процессов, в большей степени, могут быть объяснены различным уровнем солнечной и геомагнитной активности, а также величиной фазы ЗС.

Выводы. Эффекты затмения Солнца 4 января 2011 г. уверенно наблюдались в вариациях параметров тепловых процессов в геокосмической плазме. Результаты моделирования показали следующее.

1) Затмение Солнца привело к уменьшению величины энергии, подводимой к электронному газу примерно на 45 – 60 % в диапазоне высот 210 – 290 км.

2) Во время затмения имело место уменьшение модуля плотности потока тепла, переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу примерно на 60 – 70 % в диапазоне высот 290 – 410 км.

3) Эффекты ЗС 4 января 2011 г. в вариациях плотности потока тепла и энергии качественно подобны вариациям Q/N и Π_T во время ЗС в 1999 – 2008 гг., наблюдаемых над Харьковом с помощью радара НР.

Список литературы: 1. Черногор Л.Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиофизика и радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, № 1. – С. 56 – 104.
2. Акимов Л.А., Григоренко Е.И., Таран В.И., Тырнов О.Ф., Черногор Л.Ф. Комплексные

радиофизические и оптические исследования динамических процессов в атмосфере и геокосмосе, вызванных солнечным затмением 11 августа 1999 года // *Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники.* – 2002. – № 2. – С. 25 – 63.

3. Акимов Л.А., Боговский В.К., Григоренко Е.И., Таран В.И., Черногор Л.Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты солнечного затмения 31 мая 2003 года в Харькове // *Геомагнетизм и аэрономия.* – 2005. – Т. 45, № 4. – С. 526 – 551.

4. Бурмака В.П., Григоренко Е.И., Емельянов Л.Я., Лысенко В.Н., Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф. Радарные наблюдения эффектов в геокосмосе, вызванных частным солнечным затмением 29 марта 2006 г. // *Успехи современной радиоэлектроники.* – 2007. – № 3. – С. 38 – 53.

5. Бурмака В.П., Лысенко В.Н., Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005 г. в Харькове. 1. Результаты наблюдений // *Космічна наука і технологія.* – 2007. – Т. 13, № 6. – С. 74 – 86.

6. Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф. Атмосферно-ионосферные эффекты частного солнечного затмения 3 октября 2005 г. в Харькове. 2. Моделирование и обсуждение результатов // *Космічна наука і технологія.* – 2008. – Т. 14, № 1. – С. 57 – 64.

7. Емельянов Л.Я., Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф. Эффекты в геокосмической плазме во время частного затмения Солнца 1 августа 2008 г. над Харьковом. 1. Результаты наблюдений // *Космічна наука і технологія.* – 2009. – Т. 15, № 3. – С. 70 – 81.

8. Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф. Эффекты в геокосмической плазме во время частного затмения Солнца 1 августа 2008 г. над Харьковом. 2. Результаты расчетов и обсуждение // *Космічна наука і технологія.* – 2009. – Т. 15, № 4. – С. 3 – 11.

9. Chernogor L.F., Grigorenko Ye.I., Lyashenko M.V. Effects in the geospace during partial solar eclipses over Kharkiv // *International Journal of Remote Sensing.* – 2011. – V. 32, № 11. – P. 1 – 11.

10. Эванс Дж. Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн // *ТИИЭР.* – 1969. – Т. 57, № 4. – С. 139 – 177.

11. Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues // *J. Geophys. Res.* – 2002. – V. 107, № A12. – P. S14 15 1 – 16.

12. Schunk R.W., Nagy A.F. *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry.* – Cambridge atmospheric and space science series, 2000. – 555 p.

13. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. *Физика ионосферы.* – М.: Наука, 1988. – 528 с.

14. Гинзбург В.Л. *Распространение электромагнитных волн в плазме.* – М.: Наука, 1967. – 564 с.

15. Домнин И.Ф., Емельянов Л.Я., Ляшенко М.В. Вариации параметров ионосферной плазмы в течение солнечного затмения 4 января 2011 г. // 11-th Ukrainian Conference on Space Research (August 29 – September 2, 2011, Yevpatoria, Ukraine). – 2011. – P. 21.

Поступила в редколлегию 30.06.2011